

含动态裂隙岩体的高精度数字散斑相关量测方法

李元海^{1,2}, 林志斌^{1,2}, 靖洪文^{1,2}, 杨圣奇^{1,2}

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 数字图像相关与相关系数计算是数字散斑相关方法(DSCM)的基本原理与基础算法, 然而, 岩体在产生裂隙前后, 会导致裂隙区数字图像相关性的明显改变和依据相关系数计算结果的错误判断, 因此, 常规以点为中心来构建图像相关分析像素块的方法必然会产生较大误差甚至错误。为此, 基于岩体裂隙的分布特征及其简化型式的分析, 提出一种简单有效的新方法——“一点五块”法以消除裂隙影响, 在自行研制的PhotoInfor软件系统中实现了这一功能, 并针对一含双孔岩石试件单轴压缩下的变形与破裂过程进行了应用研究。结果表明: ①“一点五块”法有效解决了含有动态裂隙岩体的DSCM量测的精度问题, 巩固了数字照相量测技术在岩石破裂演变全场精细观测实验中的优势地位; ②“一点五块”法同时可作为一种DSCM通用精度提高算法, 应用于包含动态裂隙与非动态裂隙的材料变形量测中; ③在岩石单轴压缩过程中, DSCM获得了岩体变形破裂演变过程与轴向应力之间的关系, 发现了岩体在峰值附近开始出现局部较大剪应变, 但岩体结构的严重破坏则发生在接近残余应力阶段; ④DSCM能够揭示岩体内部结构破裂情况与孔洞周围变形之间的时间关系, 从而为进一步研究通过孔洞洞壁的位移来预测围岩内部变化的方法提供一个有效的手段。

关键词: 岩石力学; 数字散斑相关; 岩石试件; 单轴压缩; 裂隙

中图分类号: TU458 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)06-1060-09

作者简介: 李元海(1969-), 男, 安徽六安人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事隧道及地下工程方面的研究工作。

E-mail: lyh@cumt.edu.cn

High-accuracy digital speckle correlation method for rock with dynamic fractures

LI Yuan-hai^{1,2}, LIN Zhi-bin^{1,2}, JING Hong-wen^{1,2}, YANG Sheng-qi^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou

221008, China; 2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The digital image correlation and the calculation of correlation coefficient are the basic principle and the key algorithm of the digital speckle correlation method (DSCM). The image block correlation near the fracture zone will change much before and after the occurrence of cracks in the rock specimen. So the common image block construction method using the measured pixel point as the centre of image block will cause many errors. In order to solve the problem, a simple and efficient method named OP & FB (One pixel point and five pixels block) is put forward to eliminate the fracture impact, whose function has been implemented by coding in the self-developed software package PhotoInfor. The application results in axial compression for rock with two holes show that (1) the OP & FB method can solve the deformation measurement problem and increase the measurement accuracy for the rock with dynamic fractures induced by compression; (2) the OP & FB method can be used as a general high-accuracy method in DSCM for materials with or without dynamic fractures; (3) the relation between the fracture evolution and the axial load of rock specimen during axial compression is obtained, and local big shear strain occurs near the peak load while the critical damage of rock mass structure arises approaching the residual stress stage; and (4) the DSCM with OP & FB method can obtain the relation of the deformation on the wall of hole within the rock specimen and the crack information of surrounding rock mass. So it will provide powerful tools for establishing a forecasting technique for internal rock mass crack by measuring the displacement of the wall of the hole, and it has obvious meaning in the monitoring of tunnel engineering construction.

Key words: rock mechanics; digital speckle correlation

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174197, 51074162)

收稿日期: 2011-05-30

method; rock specimen; axial compression; fracture

0 引言

近年来, 数字照相量测技术在包括岩土工程在内的各相关领域的研究与应用呈快速发展趋势, 以“爆发式增长”形容亦不为过, 说明伴随着计算机硬件和数字照相设备的飞速发展, 这一技术凸现出越来越强大的生命力与巨大的发展潜力。数字照相量测可以理解为利用数码相机等图像采集设备, 首先对观测目标进行照相, 然后, 采用数字图像处理与分析技术, 利用研制开发的数字图像分析软件在计算机上进行目标变形计算或特征识别的一种现代量测新技术^[1]。它的技术核心是软件。为推广应用, 笔者研制了一套实用软件系统^[2], 并在多种岩土材料试验中都得到成功应用^[3-12], 它也成为笔者不断探索与实现数字照相量测新方法的基础平台^[11-12]。

数字照相量测在岩石力学实验研究领域中有着广泛应用, 主要用于研究岩石的变形破坏过程与破坏模式, 并以此为基础来进一步分析岩石的基本力学特性与工程响应^[13-16]。对于岩石材料, 裂隙的存在与分布是评判材料性能的重要指标, 更是研究岩体在外荷载条件下变形破坏的一个关键因素。本文中的“动态裂隙”概念除了指岩石含有的原生裂隙外, 还主要指外力作用过程中岩体产生并随时间不断演变的次生裂隙。对动态裂隙进行变形量测时, 采用数字散斑相关方法^[2, 9], 而不是以图像二值化为基础算法的特征识别法^[17]。

常规提高数字照相量测精度通常从两个方面考虑, 一是提高图像的分辨率或比例, 二是采用简单或复杂的亚像元插值方法^[18]。而在数字照相变形量测中, “数字图像相关(DIC)”或“数字散斑相关(DSC)”是数字图像分析的基础与核心。由于岩石表面裂隙出现后将引起裂隙区域图像相关性的改变, 导致常规相关性计算产生较大的误差甚至错误, 因此, 单纯使用上述两种方法都不能从根本上解决裂隙区图像的相关性准确分析问题。为有效分析岩石裂隙区域的变形并提高位移量测精度, 笔者提出一种针对裂隙分布特征的改进数字图像搜索方法, 有效地解决了含有动态裂隙的数字图像分析精度问题, 并在一个含有双孔的岩石试块单轴压缩过程中的变形与破裂的数字照相观测实验中进行了应用。

1 数字散斑相关量测基本算法

在数字散斑相关变形量测中, 通过数字照片序列上的像素测点所在区域图像相关性的判别, 来计算变形前后测点的坐标变化是关键。如图 1 所示, 图像相关性判别的原理通常是在两幅变形前后的图像上, 通过比较以两点为“中心”的大小相同的像素块中所有像素 RGB 颜色灰度的相关性^[18-20], 来判别它们是否为相同点。它以相关系数作为度量指标, 采用如式(1)的像素相关系数公式进行计算。首先, 计算变形后图像上一定搜索范围内的所有点(P_d)与变形前图像参考点(P_i)的相关系数, 然后, 找出其中相关系数最大的点作为要寻找的目标点, 最后, 通过计算参考点与目标点的坐标差值即可获得测点的位移, 以此为基础, 再借助于有限元等方法进行应变计算。

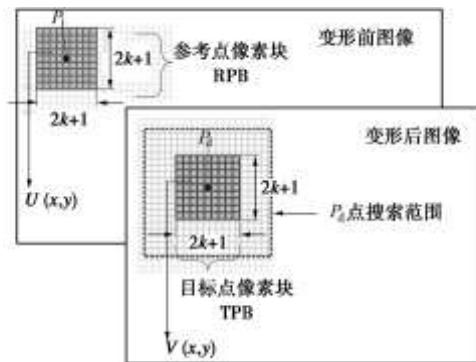


图 1 DSCM 图像相关性计算原理图

Fig. 1 Principle of digital image correlation analysis

$$R_{12} = \frac{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x, y) \times u(x, y)}{\sqrt{\sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} v(x, y)^2 \times \sum_{x=1}^{2k+1} \sum_{y=1}^{2k+1} u(x, y)^2}} \quad , \quad (1)$$

式中, R_{12} 为参考点像素块和目标点像素块的相关系数, $v_i(x, y)$ 为追踪点的像素 RGB 颜色值, $u_i(x, y)$ 为基准测点的像素 RGB 颜色值, $2k+1$ 为像素块的长或宽, 单位为像素, i 取 1, 2, 3, 代表 RGB 的 3 个颜色分量。(注: 最终相关系数是对 R, G, B 三个颜色分量分别计算出各自的相关系数, 然后求平均值。)

2 数字散斑相关搜索“一点五块”法

2.1 裂隙区域的图像特征分析

一般来说, 实际岩体裂隙的形状多呈线型或带状特征, 但由于裂隙倾向的千变万化, 裂隙实际分布形式十分复杂, 然而, 无论如何, 对于一个局部微小区域的一段裂隙, 因其倾角变化不大, 可以假定其倾向

是固定不变的,因此,可将局部小段裂隙的所有分布样式简化为如图 2 所示的垂直型、水平型、左斜型和右斜型等 4 种基本形式。这种简化为下一步进行图像相关搜索算法的改进提供了依据。

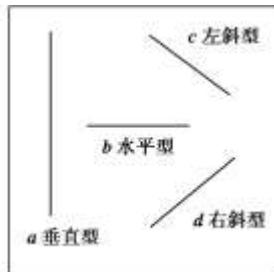


图 2 岩体局部裂隙分布的 4 种简化型式

Fig. 2 Simplified patterns of local rock fractures

2.2 图像相关搜索“一点五块”法

在数字散斑相关分析中,像素块的构建是一个关键点。显然,如图 1 所示的常规方法是以考察点(P_i 和 P_d)为中心来构建像素块,这种方法(这里称之为“一点一块”法或 OP & OB 法)在考察点附近产生裂隙时由于像素块中出现了裂隙(图像上表现为新增黑色带状区域,见图 3),致使该点所在区域裂隙产生前后的图像相关性明显降低,导致变形图像上对应的真正测点因相关系数较低而被忽略,从而产生变形量测的精度误差甚至错误。

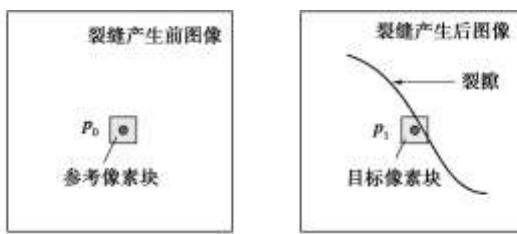


图 3 相关计算像素块“一点一块”构建方法

Fig. 3 OP & OB method for DSCM

然而,仔细观察图 3 后可以发现,只要改变一下像素块的构建方法,这一问题即可迎刃而解。如图 4 (b) 所示,“一点一块”法在裂隙附近总是不可避免地要跨越裂隙,从而导致像素块的相关性计算出现问题。而以待考察点作为像素块的 1 个角点,根据裂隙的简化分布形式,在上、下、左、右 4 个方向总能找到 1 个不会跨越裂隙的像素块(图 4 (c)),从而使得相关性计算可以避开裂隙的影响。在实际分析中,由于事先不知道裂隙的倾向,对于任意位于裂隙附近的点,无法确定像素块的构建方向,因此,需要构建包括“一点一块”在内的 5 个像素块,以覆盖“上、下、左、右、中”5 个方位,来进行全面搜索与比较,如图 5 所示,为方便起见,本文称之为“一点五块”(OP & FB, 即 One pixels Point and Five pixels Block) 法。

这种方法显然涵盖了非裂隙区域的图像相关性分析,因此,同样适用于非裂隙区域或没有裂隙产生的材料的变形分析。如图 6 所示,在 PhotoInfor 软件中如采用这种方法,只需在图像分析参数设置中勾选“一点五块”法(裂隙识别模式)选项即可。

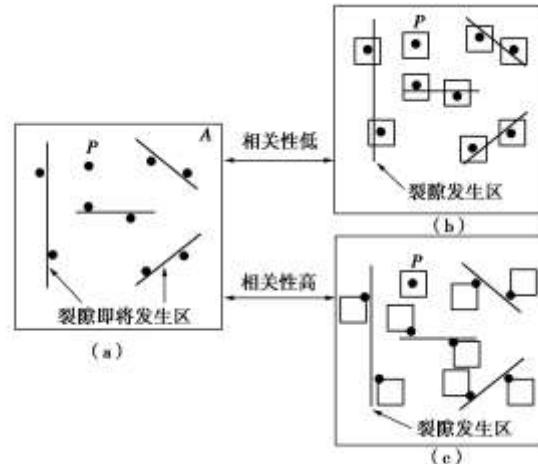


图 4 裂隙附近像素块不同构建方法

Fig. 4 Different methods for constructing pixel block for DSCM

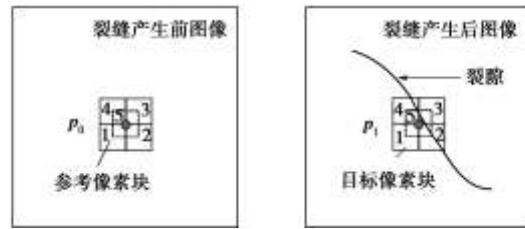


图 5 相关计算像素块“一点五块”构建法

Fig. 5 OP & FB method for DSCM



图 6 PhotoInfor 中“一点五块”法功能选项

Fig. 6 Implementation of OP & FB method in PhotoInfor

2.3 “一点五块”法的计算效果验证

采用相同网格划分,由图 7 可直观看出,“一点五块”法和“一点一块”法在非裂隙区域分析结果几乎没有差别;在裂隙附近,“一点一块”法分析则出现了错误(见图 7 (a) 圆圈标识处测点),而“一点五块”法显然有效避免了因裂隙产生的图像相关性影响,从而获得了准确的量测结果。

图 7 表明, “一点五块”法在分析含有动态裂隙的材料变形方面显然是有效的。由于它用于图像相关分析的像素块的构建方法和常规方法有所不同, 因此在分析含非动态裂隙材料和普通方法的结果可能并不完全相同, 但差别应该很小。为验证这一推断, 笔者利用一组校准实验照片 (数字照相的观测目标仅有水平刚体平移), 选择 9 个测点 (见图 8), 采用 0.1 像素的亚像元分析模式, 对“一点五块”法的相关像素块的 5 种构建方法进行了图像对比分析。计算表明, 结果 (表 1) 符合推断, 再一次确认了这一方法的有效性和正确性。

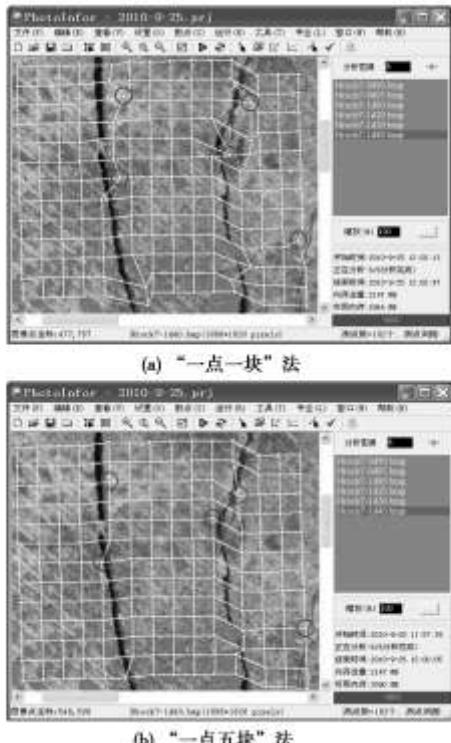


图 7 “一点五块”法的识别效果

Fig. 7 Comparison between OP & OB and OP & FB methods

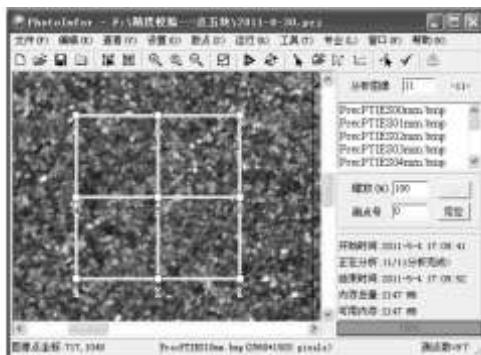


图 8 “一点五块”法检验测点设置

Fig. 8 Validation points for OP & FB method

一般来说, DSCM 量测精度和图像分析速度是一对矛盾, 一些改进算法会提高精度, 但亦将或多或少地增加计算时间。同样, “一点五块”法在提高精度的同时, 由于计算量的增加也使得分析时间相应增加。

在相同计算机软硬件环境下, 不同测点数和两种亚像元搜索模式下“一点五块”法和“一点一块”法的绝对计算时间与相对比值关系见图 9。

可以看出, 在 1 像素和 0.1 像素模式下, 测点数在 1000 以内, “一点五块”法的最长相对计算时间分别是常规方法的 3.89 倍和 1.65 倍, 这个比值在实际应用中是完全可以接受的, 说明这种方法具有实用价值。对于 0.1 像素的搜索情形, 之所以时间比值较小, 是因为亚像元搜索时, 插值计算量很大, 使得“一点五块”法增加的计算量在总的计算中所占比重降低。

表 1 “一点五块”法测点位移计算对比 (单位: 像素)

Table 1 Comparison between OP & FB and normal methods

测点	块 1	块 2	块 3	块 4	块 5	通常方法
#1	9.6	9.7	9.6	9.6	9.7	9.7
#2	9.6	9.7	9.6	9.7	9.6	9.6
#3	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
#4	9.7	9.7	9.7	9.7	9.6	9.6
#5	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
#6	9.6	9.7	9.7	9.6	9.6	9.6
#7	9.6	9.6	9.6	9.6	9.7	9.7
#8	9.6	9.7	9.6	9.6	9.6	9.6
#9	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6

注: 表中块 1~5 对应图 5 中像素块构建位置编号。

需要说明的是, 图 9 是对全部图像序列均采用“一点五块”法的计算结果。实际上, 在一个图像序列中, 为减少计算时间, 一般并不需要对所有数字图像全部选择“一点五块”法, 只需在产生裂隙的图像之间采取这种搜索模式, 因而增加的时间比全部采用“一点五块”法要少或少很多。

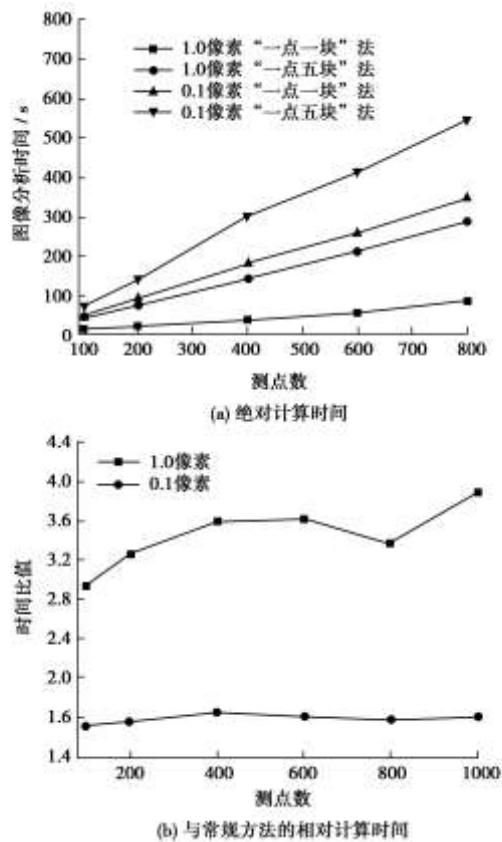


图 9 “一点五快”法的计算时间比较

Fig. 9 Comparison of image calculation time between OP & OB and OP & FB methods

综上所述,“一点五快”法可以有效提高动态裂隙岩体的数字散斑相关方法的变形量测精度,从而保证了下面给出的一个应用实例—含双孔洞岩体在单轴压缩条件下的变形与破裂实验观测结果的准确性与可靠性。

3 应用: 含双孔岩石单轴压缩实验

3.1 实验系统

实验采用美国 MTS 公司 MTS815.02 型电液伺服岩石力学试验系统,选择轴向位移控制方式,位移加载速率为 0.002 m/s,采用尼康 E8800 数码相机(800 万像素分辨率)和两盏 200 W 普通白炽灯(图 10)与红外遥控进行图像采集。



图 10 数字照相变形量测实验系统

Fig. 10 Photogrammetric system for rock compression tests

3.2 实验材料与过程

试件采用白色大理石,试件长宽厚为 10 cm × 10 cm × 10 cm,用岩石切割机加工并钻孔制作而成。试件外围与孔洞尺寸如图 11 所示。

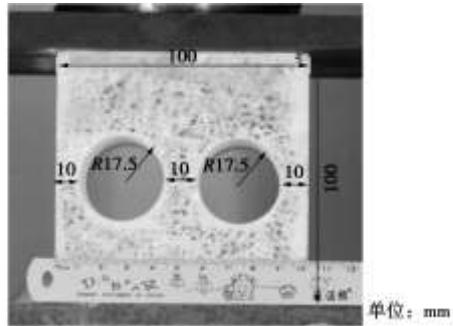


图 11 岩石试件及比例尺设置

Fig. 11 Rock specimen and scale ruler

为增强图像纹理,首先进行人工制斑,然后设置 MTS815 试验加载与数据采集系统,接着安设并调试相机与灯光,为标定图像比例,在拍摄第 1 幅照片时,靠近试件底部放置一把标尺,获得图像比例为 0.067 mm/pixel,最后,按轴向位移每隔 0.05 mm 拍摄一张照片,直至试件破坏。

这里强调一点,即在试验过程中一定要做好每张照片对应的试验阶段信息的记录,如轴向位移、加载情况、岩石的变形与破裂等肉眼可以观察到的试件状态信息等。该记录有的由计算机自动进行,有的则需人工记录,目的是确定每张图像与试验阶段的对应关系,以便后期对每张图像的变形量测结果进行针对性分析。

3.3 实验结果

(1) 荷载位移关系曲线

试件单轴压缩过程中的荷载位移关系曲线如图 12 所示。由图 12 中可以看出,含有双孔的岩石试件的应力-应变曲线形态可以划分为如下 5 个阶段:①由于岩石内的微裂隙在外力作用下逐渐闭合的 AB 压密阶段;②压密完成后的 BC 弹性变形阶段;③岩石应力接近和超过其屈服应力的 CD 塑性变形阶段;④

应力峰值以后的快速脆性 *DE* 破坏阶段; ⑤残余应力变形 *EF* 阶段。此外, 由 *DE* 台阶形的曲线形态可以推断岩体在破坏过程中呈现出“破裂—应力下降”、“压密—应力恒定或微增”和“再破裂—应力再降”的渐进性特征, 这一现象对于工程的指导意义可以理解为尽管岩体在峰值以后产生破裂, 但并未很快失去承载力, 因此, 如能通过及时支护来阻止其继续变形, 则有可能将岩体应力维持在一个较高水平, 从而避免因变形持续发展而导致岩体承载力急剧下降以致工程最终失去稳定性。

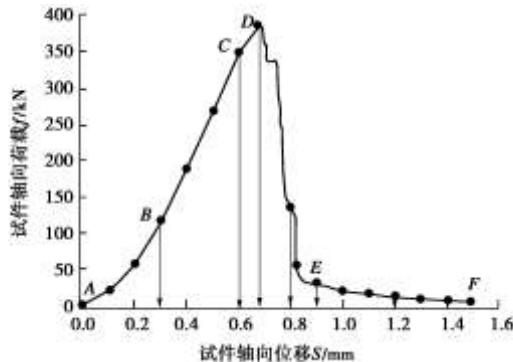


图 12 岩石试件荷载-位移曲线

Fig. 12 Curves of axial displacements and loads during tests

图 13 为峰值应力前后试件变形破坏的 2 幅图像, 峰值以后岩体出现明显的裂缝。从照片上很难看出峰值处的孔洞周围岩体是否出现破裂, 但可以看出左孔洞的左侧内壁出现了明显的破裂脱皮现象。

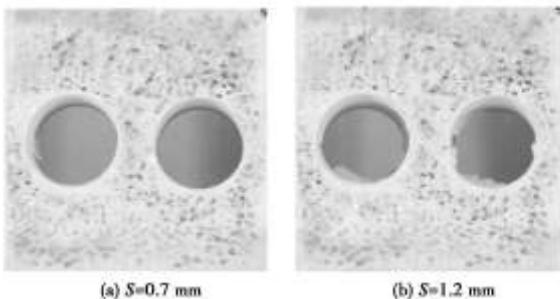


图 13 峰值应力前后双孔试件变形破裂写真

Fig. 13 Pictures of rock specimen before and after peak load

(2) 岩石表面动态裂隙的发展演变

在位移加载的应力峰值前后 6 个阶段 (图 12 中的箭头所指) 的岩石表面最大剪应变场如图 14 所示。

由图 14 中可知, 在压缩过程中, 较大变形首先出现在孔洞周围, 然后是上部及孔洞之间。此外, 实验结果表明, 在图 12 所示的宏观上岩体整体变形处于压密及弹性阶段, 但局部区域, 尤其是孔洞壁边已经出现较大的变形, 特别是在接近峰值附近 ($S=0.7$ mm), 由孔洞壁边产生较大的剪应变, 可以推断出此时裂隙已经产生, 而贯穿左孔洞上部和孔洞之间的裂隙此时还未完全形成。由此可以说明, 在应力峰值点处, 岩体因局部出现裂隙而使承载力不再继续增长, 但即便是过了峰值点后的某点 ($S=0.8$ mm), 几条最终贯通的裂隙此时还没有贯通, 也即峰值点前后岩体的结构破坏并不严重。同时发现岩体在峰值附近出现局部较大的剪应变, 但岩体结构的严重破坏时间点则主要发生在接近残余应力阶段 ($S=0.9$ mm) 而不是峰值前后。

(3) 岩石表面的局部变形特点

为了通过定量分析来考察岩体在峰值前后的位移变化特征, 同时试图获得孔洞周围位移与岩体内部裂隙衍生之间的关系, 如图 15 所示, 在岩体变形网格上的孔洞周围及裂隙附近选择几个点绘制出测点位移与试件轴向位移之间的关系曲线如图 16~18 所示。由图 16~18 可知, 各点的水平位移和竖向位移在应力峰值以前基本相同 (除#2 点外), 说明此段时间内的岩石在压密和弹性阶段表现为整体均匀变形的特征。而在峰值以后, 根据裂隙的产生与否, 不同区域的位移量值有所不同, 特别是测点#5~#8 和点#12、#13 在峰值以后由于岩体贯通裂隙的产生使得右半部岩体几近切断, 因此位移明显比其他各点大。

此外, 尽管在工程中隧道拱顶或边墙位移变化速率的异常可以作为围岩稳定性异常的征兆, 早已取得共识, 但围岩内部的变化与洞壁位移速率的变化发生的时间先后关系并不十分清楚。而从实验结果可以看出, 洞壁位移与裂隙附近位移速率都是在应力峰值点附近 ($S=0.7$ mm) 发生突变, 说明孔洞壁边位移和岩体内部裂隙的发生时间具有一致性。当然, 实际工程中, 洞壁位移的变化与岩体内部变化不是一对一的简单关系, 但相关问题可以借助 DSCM 进行深入研究,

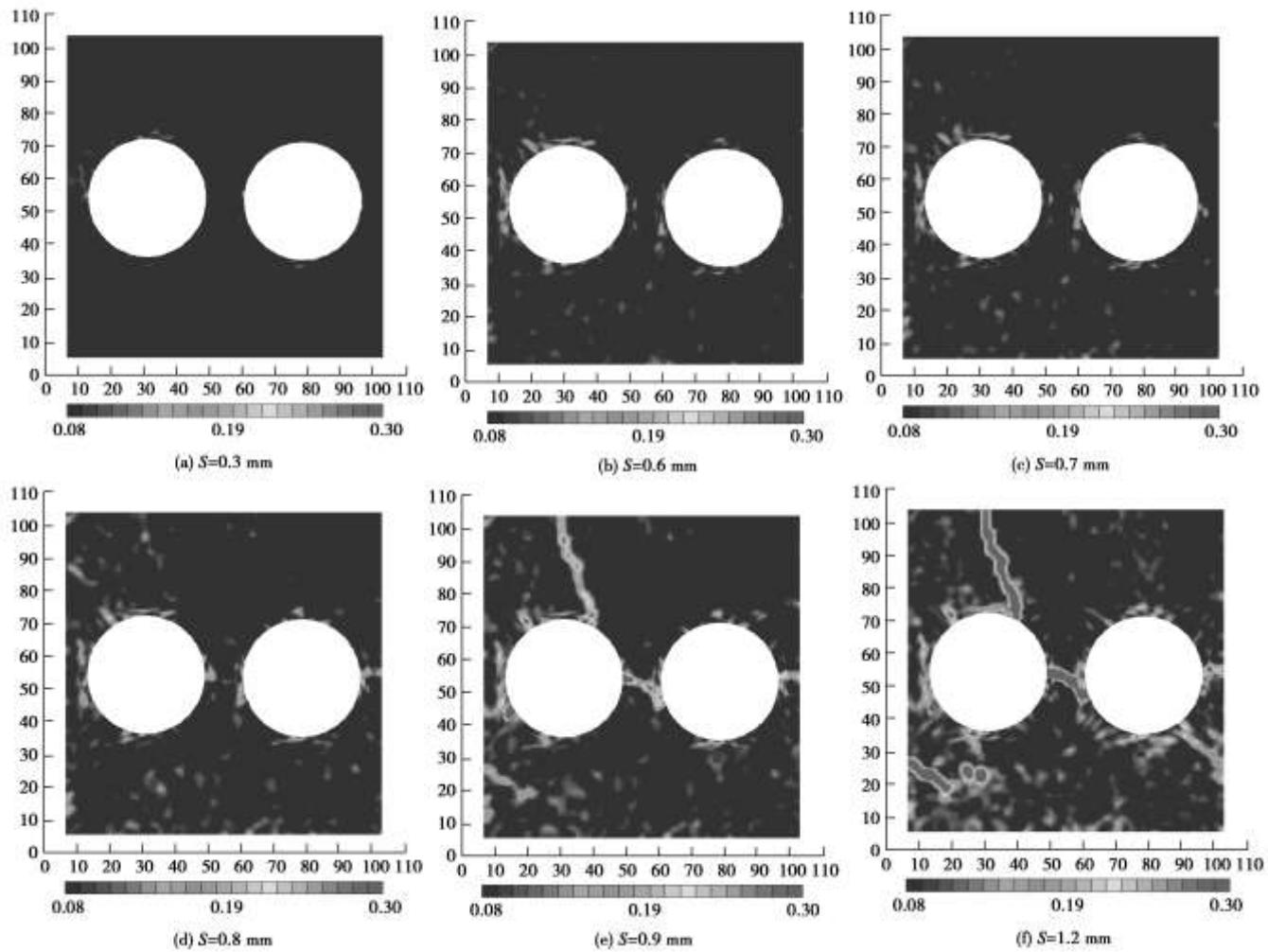


图 14 岩石表面最大剪应变场

Fig. 14 Maximum shear strain fields on rock surface

意义在于可望通过掌握洞壁表面位移与岩体内部变化的关系与规律, 找到一种岩体内部的结构破裂或地质情况变化的预测方法, 从而为工程施工安全服务。

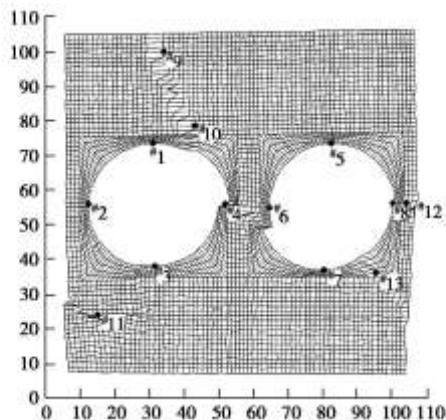


图 15 岩体表面测点选择位置示意图

Fig. 15 Position of selected points

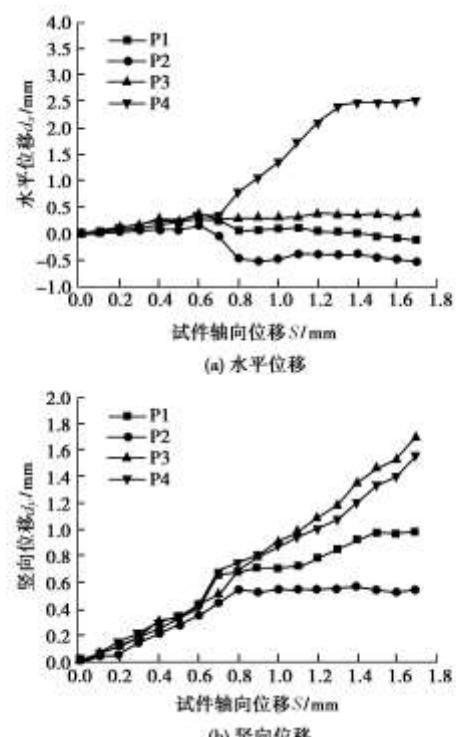


图 16 左孔测点位移 - 试件轴向位移关系

Fig. 16 Curves of point displacement on left hole-wall and axial

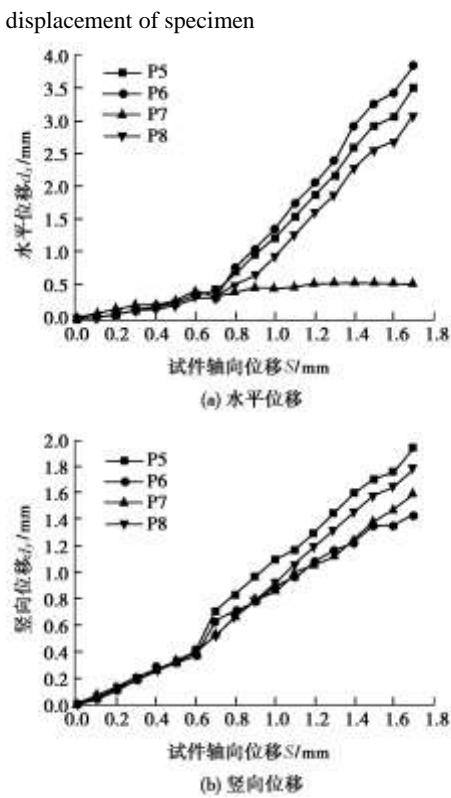


图 17 右孔测点位移-试件轴向位移关系

Fig. 17 Curves of point displacement on right hole-wall and axial displacement of specimen

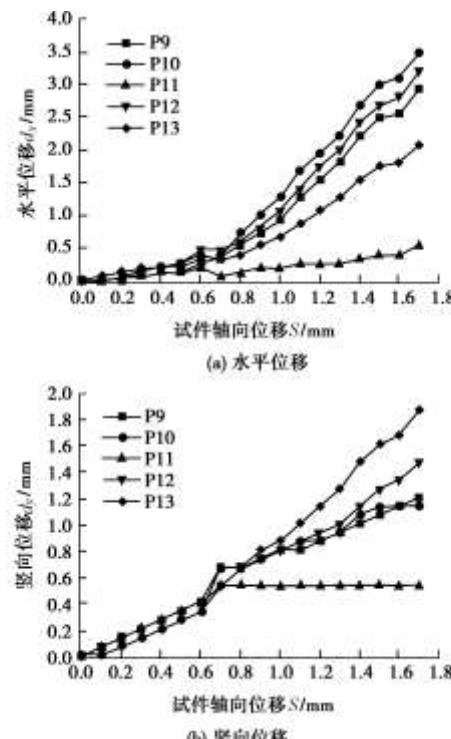


图 18 裂隙附近测点位移-试件轴向位移关系

Fig. 18 Curves of point displacement near broken zone and axial displacement of specimen

4 讨 论

4.1 关于提高岩土材料变形量测精度问题

包括岩石在内的岩土材料通常具有变形大和变形局部化的特点, 提高数字散斑相关量测精度除了采用高分辨率相机及提高图像清晰度等方法外, 以下 2 点亦值得注意和研究。

(1) 通过分割像素单元来建立亚像元图像计算方法无疑是一种提高精度的基础图像分析方法, 但像素分割越小, 计算精度未必会成比例提高, 而计算时间则会大幅上升, 因此, 笔者建议多数情况下亚像元参数采用 0.1 像素为宜。

(2) 对于岩土材料, 由于大变形或破裂现象的普遍存在而导致的图像相关性降低影响量测精度问题, 针对数字散斑相关分析, 需要在图像搜索方法和误差判别等方面做进一步探索研究。

4.2 进一步提高裂隙演变过程精细捕捉问题

岩石相对于一般砂土、黏土、相似材料或者混凝土, 它的脆性特征比较明显, 特别是在峰值破裂前后更是具有突发性, 要想完全捕捉到岩体裂隙产生的全部过程, 就需要提高拍照速度。而一般数码相机的图像采集速度则受到相机拍摄与图像存储速度的限制

(如佳能 EOS5D 存储一张 1280 万像素的 RAW 格式的数字图像用时约 4 s); 另外, 就是采用高速摄像机进行拍摄。但高速摄像可能同时带来两个问题, 一是通过摄像采集的图像分辨率一般比数码相机低, 量测精度也随之降低; 二是笔者在研究中发现, 对于两张时间间隔极小的图像, 裂隙区附近变形较大, 但裂隙区外位移可能非常小以致超出一般图像分析的精度, 导致连续两张图像间的像素微小位移无法识别, 从而在图像序列间产生不可忽视的累积误差, 这些问题都值得进一步研究解决。

4.3 作为通用高精度的数字散斑相关量测方法

本文提出的“一点五块”法最初是为了解决岩体动态裂隙的图像相关分析的精度问题, 但同时亦可作为一种精度提高算法适用于一般图像序列分析。例如, 对于实验照片中局部偶然出现的白斑(隔着玻璃拍照容易出现这种情形), 采用“一点五块”法可以最大限度地消除这种白斑产生的量测精度影响。

5 结 论

(1) 基于岩体裂隙的分布特征, 在数字散斑相关方法的图像分析中, 提出了“一点五块”法, 有效解决了动态裂隙岩体的变形准确识别和高精度量测问题, 巩固了数字照相量测技术在岩石破裂演变全场精细观测实验中的优势地位。

(2) “一点五块”法可以作为一种通用的数字散

斑相关量测的精度提高算法,不仅适用于包含动态裂隙的岩石类材料的变形量测,同时也适用于其他材料的高精度变形分析。

(3) 数字散斑相关方法获得了岩体变形破裂过程与轴向应力之间的关系,发现了岩体压缩过程中在峰值附近开始出现局部较大剪应变,但岩体结构的严重破坏则发生在接近残余应力阶段。

(4) 数字散斑相关方法能够揭示含孔洞岩体的内部结构破裂情况与孔洞周围变形之间的时间关系,从而为研究通过孔洞洞壁的位移来预测围岩内部状态变化的方法,提供一个有效的手段。

(5) 对于岩体裂隙的产生、发展与演变过程的精细观测与分析,在数字图像采集速度与变形分析精度的提高等方面,需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 李元海. 数字照相量测技术及其在岩土工程实验中的应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2009. (LI Yuan-hai. Digital photogrammetry-based deformation measurement technique and its application in geotechnical engineering test[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 李元海, 靖洪文. 基于数字散斑相关法的变形量测软件研制及应用[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(5): 635 - 640. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen. Software development of a digital speckle correlation method and its application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(5): 635 - 640. (in Chinese))
- [3] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟. 断续节理岩体中围岩破裂区的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 37(1): 62 - 66. (LIU Gang, ZHAO Jian, SONG Hong-wei. Model experiments on the broken zone in intermittently jointed surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 62 - 66. (in Chinese))
- [4] 周健, 张刚, 曾庆有. 主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 650 - 656. (ZHOU Jian, ZHANG Gang, ZENG Qing-you. Model tests and PFC^{2D} numerical analysis of active laterally loaded piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 650 - 656. (in Chinese))
- [5] 陈荣华, 王路珍, 孔海陵. 数字图像相关法在相似材料模拟试验中的应用[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 605 - 611. (CHEN Rong-hua, WANG Lu-zhen, KONG Hai-ling. Application of similar material simulating experiment based on DICM[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 605 - 611. (in Chinese))
- [6] 朱维申, 张乾兵, 李勇, 等. 真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 1 - 7. (ZHU Wei-shen, ZHANG Qian-bing, LI Yong, et al. Development of large-scale geomechanical model test system under true triaxial loading and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] 詹乐, 李镜培, 饶平平. 坡顶邻近处群桩对边坡的挤土效应模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 150 - 153. (ZHAN Le, LI JING-pei, RAO Ping-ping. Model tests on compacting effect of jacked group piles near slope top[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 150 - 153. (in Chinese))
- [8] 刘招伟, 李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 133 - 139. (LIU Zhao-wei, LI Yuan-hai. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 133 - 139. (in Chinese))
- [9] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土实验模型变形场量测[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 36 - 41. (LI Yuan-hai, ZHU He-hua, UENO Katsutoshi, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 36 - 41. (in Chinese))
- [10] 李元海, 干晓蓉, 彭辉. 数字照相在混凝土变形量测中的实验研究[J]. 昆明理工大学学报, 2007, 32(4): 43 - 47. (LI Yuan-hai, GAN Xiao-rong, PENG Hui. Experimental research of close range photogrammetric technique on the deformation measurement for concrete specimen[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2007, 32(4): 43 - 47. (in Chinese))
- [11] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1684 - 1690. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, LIU Gang, et al. Study of application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(8): 1684 - 1690. (in Chinese))
- [12] 李元海, 靖洪文, 朱合华, 等. 基于图像相关分析的土体剪切带识别方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 522 - 526. (LI Yuan-hai, JING Hong-wen, ZHU He-hua, et al. A technique of identifying the shear band accurately in granular soil using

image correlation analysis[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(3): 522 - 526. (in Chinese))

[13] FERRERO A M, MIGLIAZZA M, RONCELLA R. Analysis of the failure mechanisms of a weak rock through photogrammetrical measurements by 2D and 3D visions[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, **75**: 652 - 663.

[14] 潘一山, 杨小彬, 马少鹏. 岩石变形破坏局部化的白光数字散斑相关方法研究[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(1): 98 - 100. (PAN Yi-shan, YANG Xiao-bin, MA Shao-peng. Study on deformation localization of rock by white light digital speckle correlation method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(1): 98 - 100. (in Chinese))

[15] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 岩石材料基于天然散斑场的变形观测方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, **21**(6): 792 - 796. (MA Shao-peng, JIN Guan-chang, PAN Yi-shan. Deformation measurement method for rock materials based on natural speckle pattern[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, **21**(6): 792 - 796. (in Chinese))

[16] 马少鹏, 周 辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, **27**(8): 1667 - 1673. (MA Shao-peng, ZHOU Hui. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(8): 1667 - 1673. (in Chinese))

[17] 范留明, 李 宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, **24**(5): 792 - 797. (FAN Liu-ming, LI Ning. Study on rock mass joint measurement based on digital photogrammetry[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(5): 792 - 797. (in Chinese))

[18] 潘 兵, 谢惠民, 戴福隆. 数字图像相关中亚像素位移测量算法的研究[J]. *力学学报*, 2007, **39**(2): 245 - 252. (PAN Bing, XIE Hui-min, DAI Fu-long. An investigation of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, **39**(2): 245 - 252. (in Chinese))

[19] 张怀清, 蒲 琦, 代祥俊, 等. 基于数字散斑相关方法的微位移测量[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2009, **23**(1): 49 - 52. (ZHANG Huai-qing, PU Qi, DAI Xiang-jun, et al. Measurement of micro-displacement based on digital speckle correlation method[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **23**(1): 49 - 52. (in Chinese))

[20] 叶 南, 张丽艳. 大变形下基于数字图像相关的改进分段位移传递法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 976 - 983. (YE Nan, ZHANG Li-yan. Improved fractionized displacement transfer algorithm based on digital image correlation in large deformation applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 976 - 983. (in Chinese))